



## 隆起・侵食に伴う地質環境の長期的変動を考慮した 放射性廃棄物地層処分の安全評価手法の開発

著者	若杉 圭一郎
号	61
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5264号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00122195">http://hdl.handle.net/10097/00122195</a>

氏 名	わかすぎ けいいちろう
授 与 学 位	若 杉 圭 一 郎 博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成28年9月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）量子エネルギー工学専攻
学 位 論 文 題 目	隆起・侵食に伴う地質環境の長期的変動を考慮した放射性廃棄物 地層処分の安全評価手法の開発
指 導 教 員	東北大学教授 新堀 雄一
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 新堀 雄一 東北大学教授 岩崎 智彦 東北大学教授 佐藤 修彰 東北大学准教授 桐島 陽

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 序論

地層処分を安全に進めるためには、その前提として長期にわたり安定な地質環境を選定することが不可欠である。これは、わが国が変動帯に位置していることを踏まえれば、特に重要な意味を持つ。すなわち、局所的かつ突発的な地質環境の変動（例えば、断層や火山活動）が想定される地域は、サイト選定のプロセスにおいて、綿密な調査・評価により回避することが必要である。一方、わが国の幅広い地域で確認されている緩慢な現象（例えば、気候変動や隆起・侵食）については、その影響が著しい地域は除外されるものの、影響自体をサイト選定で回避することが難しいため、その影響を予め評価に含めておくことが重要である。さらに、隆起は、将来十万年程度の期間については大きく変わらないとされており、これと侵食が長期間に渡り継続すれば、地下 300 m 以深に建設される処分場と人間の生活圏との離間距離が徐々に短縮し、極端な想定の場合として処分場が地表面に接近することも考えられる。

これまでの隆起・侵食を考慮した既往の安全評価では、隆起速度と侵食速度が等しいとの仮定の下、処分場が一定の速度で地表面に接近し、一斉に処分場が酸化帯へ侵入するとともに、その後処分場は地表面に露出し侵食により一様に削剥されるという仮定に基づく、保守的ではあるものの簡易なモデルによる評価が行われた。しかしながら、わが国には、隆起速度と侵食速度が異なる地域が多数存在していることから、それらの多様な地質環境のうち、既往の評価条件がカバーする範囲は限定的であった。また、海外における安全評価においても隆起・侵食は、多くの場合 FEP (Feature, Event and Process) のスクリーニングの段階で除外されており、一部定性的な検討は行われているものの、隆起・侵食に対する安全評価手法はこれまで十分な検討がなされてこなかった。

このため本研究では、わが国の地質環境の長期的変動のうち蓋然性が高い隆起・侵食に着目し、シナリオ解析手法の開発、核種移行解析を行うための評価技術の開発、さらに、パラメータ・モデルの不確

実性評価技術の開発を通じて、隆起・侵食が地層処分に与える影響を評価するための手法を開発した。

## 第2章 地質環境の長期的変動を考慮するためのシナリオ解析の技術開発

隆起・侵食を含む地質環境の長期的変動を安全評価で考慮するためには、まず、地質環境の変動に伴う処分システムの状態変遷をシナリオで適切に考慮することが必要である。特に、従来の FEP に基づくボトムアップアプローチによるシナリオ解析では、地質環境の長期的変遷を取り扱うために必要となる時間軸が積極的に考慮されていないため、システムの状態変遷が分かりにくい、シナリオの全体像が俯瞰しにくい、などの課題があった。このため、図1に示すストーリーボードを活用した新しいシナリオ解析手法を開発した。ストーリーボードとは、安全機能に影響を与える可能性のある FEP の特性に応じて時間および空間スケールを区分し、地層処分システムの挙動の概観と安全機能の発揮・劣化等についてトップダウン的に検討する手法である。この手法を用いてシナリオ解析を試行した結果、時間・空間を軸にマトリクス的に区分されたストーリーボードに沿って、熱・水理・応力・化学の観点から安全機能に与える主要なプロセスを、簡潔に表現できることを確認した。また、地層処分システムの将来挙動を視覚的に分かり易く表現するストーリーボードは、各分野の専門家が議論するための共通のプラットフォームとなり、技術情報の共有とコミュニケーションの効率化が図られた。さらに、検討の過程で用いた情報、出典、ストーリーボードの履歴などを記録することで追跡性、透明性が向上するとともに、安全機能を軸としたトップダウン的なアプローチと FEP リストを用いたボトムアップアプローチを相互に補完させ、分かり易さを向上させつつも、重大な見落としがないように FEP リストと照査することでシナリオの網羅性を高めることが可能であることを確認した。以上の検討を通じて、ストーリーボードによるトップダウン的なアプローチと FEP によるボトムアップ的なアプローチを統合したシナリオ解析手法を確立した。

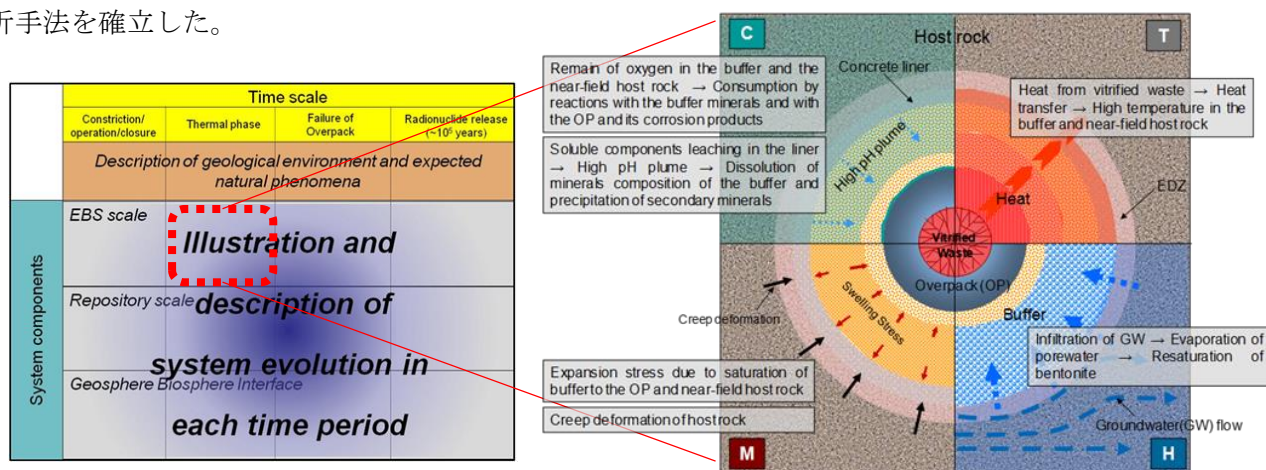


図1 ストーリーボードのフォーマットと熱的過渡期における人工バリアのストーリーボードの例

### 第3章 隆起・侵食による長期的変動を考慮した安全評価手法の開発

本章では、第2章で示した手法で構築される隆起・侵食の長期的変動を考慮したシナリオに基づき、核種移行解析を行うための手法を開発した。具体的には、わが国の代表的な地形発達過程を定式化したモデルに基づき隆起・侵食速度の長期変遷を評価するとともに、これによる地表面の平均標高とその起伏の時間変化、処分場の深度の時間変化を評価した。さらに、これらと関連付けて風化帯および地表面に到達する廃棄体数と到達時期のばらつきを求め、隆起・侵食に伴う地質環境条件と処分システムの状態変遷を明らかにした。この処分場の地表接近を想定したシナリオに基づき、図2（左）に示す概念モデルを構築するとともに、核種移行解析を行うための評価コードを新たに開発した。これを用いて解析を行った結果、わが国の隆起速度の最頻値である  $0.3\text{mm/y}$  のケース（図2（右））において、地下水移行シナリオ、直上での建設・居住シナリオのいずれのシナリオにおいても、地表面の起伏に起因して廃棄体が風化帯へ分散して侵入する効果等により、国際機関で示されている放射線防護基準のめやす値（ $300\mu\text{Sv/y}$ ）を下回った。なお、隆起・侵食シナリオについては、処分場が地表に接近する前の安全機能の発揮による核種の閉じ込めにより、地表接近時に多くの核種が地表面に至るという結果を導くトレードオフの関係が存在するため、処分場の地表接近前後で共に線量を下げることが困難であったが、本研究で着目した地形の起伏に起因して廃棄体の風化帯への侵入が分散する現象はどの評価期間の線量とも競合することのない線量を低下させる方向に働く現象であった。これは、わが国の地形が起伏に富んでいることを踏まえれば、蓋然性の高い効果であり、今後も積極的に評価に取り込むことで処分システムの長期的な安全性の見通しを合理的に確かなものにしていく見通しが得られた。以上の検討を通じて、隆起・侵食による長期的変動を考慮して核種移行解析を行うための評価手法を整備した。

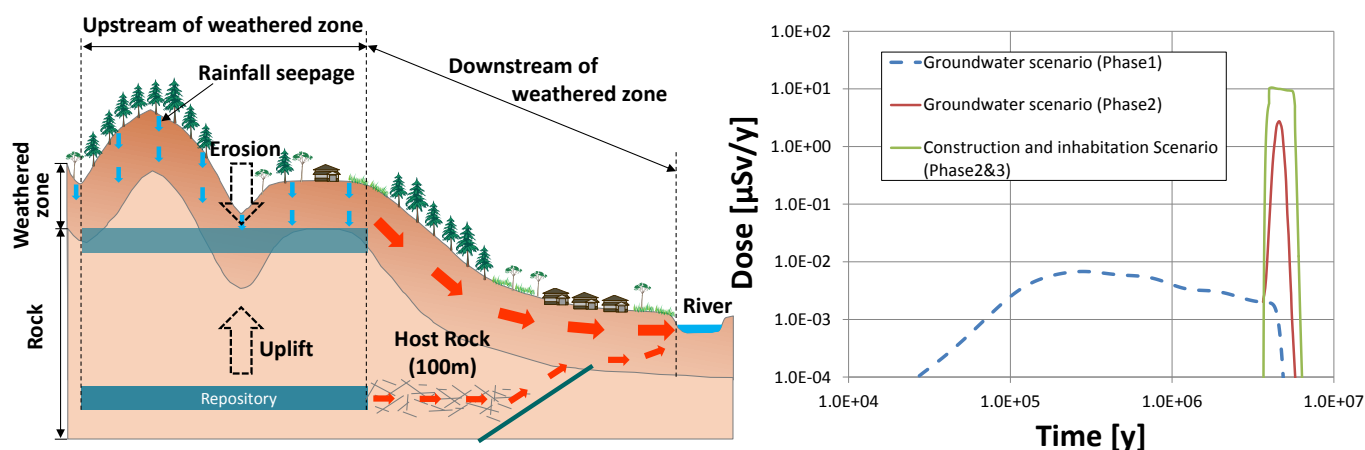


図2 隆起・侵食による処分場の地表を想定したシナリオの概念モデル（左）とこれに基づく線量評価結果（右）：フェーズ1は初期深度から風化帯到達まで、フェーズ2は風化帯侵入から地表到達まで、フェーズ3は地表到達以降の期間を対象

## 第4章 パラメータ・モデルの不確実性評価技術の開発

隆起・侵食を考慮した安全評価においては、百万年以上の期間を評価対象としており、これに伴って派生するシナリオ、モデル、パラメータの不確実性を完全に排除することは困難である。このため、本章では、パラメータ・モデルの不確実性の影響を評価するための技術開発を行った。なお、シナリオの不確実性は第2章で対応しているため、ここでは取り扱わない。パラメータの不確実性については、複数の不確実性を同時に扱うことができる確率論的評価コードを開発するとともに、この解析から得られる入出力のデータセットを対象に、複数の統計的手法を組み合わせた感度解析手法を開発した。この結果、非線形性が高い入出力のデータセットにおいても複雑なパラメータの感度構造を解きほぐすことが可能となり、局所的でも安全性に感度の高い重要な不確実性を見落とすことなく把握するための技術を整備した。また、パラメータ不確実性の検討において重要なパラメータと同定された透水量係数分布の平均値について、これと直接的な関係がある掘削影響領域中の地下水流れおよび核種移行に着目し、2次元核種移行解析モデルにより掘削影響領域の遅延効果を定量的に評価した。この結果、これまで保守的に無視していた掘削影響領域での遅延効果により、安全評価上重要な核種の一つである Cs-135 の最大移行率が1桁減少した。さらに、本章で開発したパラメータ不確実性評価技術を第3章に示した隆起・侵食プロセスのパラメータへ適用し、パラメータ不確実性の重要度を評価した。さらに、図3に示すように、上記の不確実性評価技術を総合的に活用し、得られた情報を各研究分野へフィードバックすることにより、効率的かつ効果的に地層処分システムの安全性の信頼性向上を図る考え方を提示した。

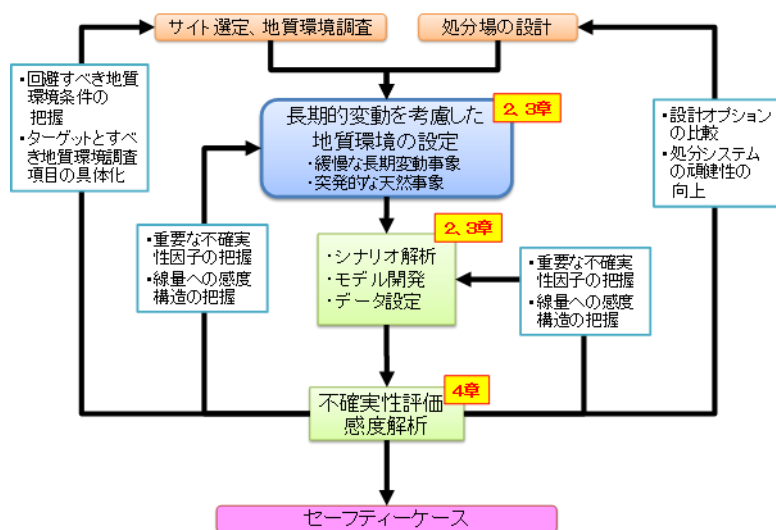


図3 不確実性評価技術を用いた総合的安全評価の流れ

## 第5章 結論

以上の検討を通じて、本研究では、わが国における地質環境の長期的変動において蓋然性が高いと考えられる隆起・侵食の影響を考慮した安全評価手法の開発を目的として、隆起・侵食の影響をより現実的に考慮した地質・地表環境の長期的変動の設定や、これを前提としたシナリオ解析・核種移行解析などを行うための安全評価技術、さらには重要な不確実性を特定するための不確実性評価技術を整備した。これらの評価技術により、隆起・侵食を考慮した安全評価のみならず、追跡性・透明性の高い安全評価の品質管理や研究開発課題の優先度の意思決定に必要な情報提供などが可能となり、地層処分の安全性の信頼性を高めることに貢献することが可能となった。

# 論文審査結果の要旨

地層処分を安全に進めるためには、その前提として長期にわたり安定な地質環境を選定することが不可欠である。これは、わが国が変動帯に位置していることを踏まえれば、特に重要な意味を持つ。これまで、隆起・侵食を考慮した既往の安全評価では、隆起速度と侵食速度が等しいとの仮定の下、簡易なモデルによる評価が行われてきた。しかしながら、わが国には、隆起速度と侵食速度が異なる地域が多数存在していることから、その多様な地質環境のうち、既往の評価条件がカバーする範囲は限定的であった。そこで、本論文では、わが国の地質環境の長期的変動のうち蓋然性が高い隆起・侵食に着目し、シナリオ解析手法の開発、核種移行解析を行うための評価技術の開発、さらに、パラメータ・モデルの不確実性評価技術の開発を通じて、隆起・侵食が地層処分に与える影響を評価するための手法を開発したものであり、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本論文の背景および目的を述べている。

第2章では、地質環境の長期的変動を考慮するためのシナリオ解析の技術開発について、従来のFEP (Feature, Event and Process)を用いたボトムアップ的な方法に、トップダウン的な概念を融合させたストーリーボードによるシナリオ解析手法を構築し、地質環境の長期的変動とそれに伴う処分システムの状態変遷を時系列的に表現することにより、シナリオの導出までのプロセスの透明性と分かり易さの向上を図った。従来のFEPに基づくボトムアップアプローチによるシナリオ解析では、地質環境の長期的変遷を取り扱うために必要となる時間軸が積極的に考慮されていないため、システムの状態変遷が分かりにくいことやシナリオの全体像が俯瞰しにくいことなどの課題があった。提案した手法はそれら課題を解決するもので、熱・水理・応力・化学の観点から安全機能に与える主要なプロセスを簡潔に表現するとともに、重大な見落としがないようにFEPリストと照査することにより、シナリオの網羅性を高めることに寄与した。

第3章では、隆起・侵食による長期的変動を考慮した安全評価手法の開発を行っている。この手法は、地質環境の長期的変動として隆起・侵食に着目し、隆起・侵食に伴う地表の起伏とその時間変化を地形発達モデルで表現し、これと関連付けて処分場の深度、風化帯および地表への到達時期、到達する廃棄体数などを系統的に評価するものである。本章では、この手法を基に安全評価を行い、「地下水移行シナリオ」および「直上での建設・居住シナリオ」のいずれのシナリオにおいても、地表面の起伏に起因して廃棄体が風化帯へ分散して侵入する効果等により、国際機関で示されている放射線防護基準のめやす値( $300 \mu\text{Sv/y}$ )を下回ることを示した。

第4章では、パラメータ・モデルの不確実性評価について新たな手法を開発している。第3章において取り扱った隆起・侵食を考慮した安全評価においては、百万年以上の期間を評価対象としており、これに伴って派生する不確実性を完全に排除することが困難である。また、第2章はシナリオ不確実性への取り組みの一部にも相当する。そこで、本章では、各シナリオにおけるパラメータ・モデルの不確実性の影響を評価するために、確率論的評価コードおよび解析の入出力のデータセットを対象に、複数の統計的手法を組み合わせた感度解析手法を開発した。さらに、本章で開発した手法を第3章に示した隆起・侵食プロセスのパラメータへ適用し、パラメータ不確実性の重要度を評価した。

第5章では、結論として、本論文から得られた成果について総括している。

以上要するに、本論文は、放射性廃棄物の地層処分システムについて、隆起・侵食の影響を考慮した安全評価手法を新たに開発し、地層処分の安全性の信頼性を高めることに貢献することを可能とするものであり、放射性廃棄物の処分に関連する原子力バックエンド分野および量子エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。